第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

基于GRACE数据的黄河流域地下水储量变化与人口暴露研究

邓 椿[1,2]， 蒋晓辉[1]， 孙维峰[2]

（1. 西北大学城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；
2. 运城学院经济管理系，山西 运城 044000）

摘 要：近年来黄河流域人与水资源矛盾愈发突出，尤其是地下水储量的过度消耗已成为限制该区域人与自然和谐发展的主要矛盾之一。基于重力反演与气候实验卫星数据和全球陆面数据同化系数数据，根据流域水循环与水量平衡原理，测算2003—2016年黄河流域地下水储量的变化情况，在探究其时空变化特征的基础上，识别了地下水储量下降明显区域的人口暴露度。结果表明：(1) 空间分布上，黄河流域地下水储量西多东少，由西向东下降程度不断加剧，且下降区域呈现由下游向中上游扩散的态势。下降区域主要集中在中东部地区，变化等级以较剧烈减少和剧烈减少为主。(2) 时间变化上，2003—2016年黄河流域地下水储量整体呈下降趋势，年均降幅为5.93 mm·a^{-1}。其中，2004—2016年为连续下降，2015—2016年的下降幅度最大；另外，地下水储量时间变化存在季节效应，地下水储量下降幅度春季最大、冬季次之、秋季再次之、夏季最小。(3) 地下水暴露风险状态下的地级市人口密度在空间上呈东高西低、中部交错分布的状态，暴露风险人口密度最大地级市共16个；地下水储量下降人口累积百分比呈现明显上升的趋势，在2016年达到最大值。研究结果以期为黄河流域地下水资源可持续利用提供科学参考。

关 键 词：GRACE；地下水储量变化；时空特征；人口暴露风险；黄河流域
文章编号：1000-6060(2022)06-1836-11(1836~1846)

随着人类活动加强，水资源消耗进一步加剧，人水矛盾日益凸显[1]。地下水作为水资源的重要组成部分，由于储量稳定，水质好，可被各行各业直接使用，是人类活动的必需品[2-3]，对人类生存发展与资源可持续至关重要[4]。然而，部分地区由于不合理的利用，导致水资源问题日益加剧，引发了地面沉降、海水倒灌、地下水资源量枯竭等环境问题，加剧了人水矛盾，尤其是在干旱半干旱地区更为突出[5-7]。2019年9月习近平总书记在河南郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话，明确指出黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位，深刻阐明黄河流域生态保护和高质量发展的重大意义，作出了加强黄河治理保护、推动黄河流域高质量发展的重大部署[8]。在此背景下，研究黄河流域长时间序列的地下水储量变化，对该区域的水资源可持续利用具有重要的科学意义。

传统的地下水储量监测方法耗时耗力，且在监测点以外的区域形成了监测盲区，无法及时了解地下水储量的变化情况[9-10]，而重力反演与气候实验(Gravity recovery and climate experiment，GRACE)卫星数据为监测大尺度区域地下水储量变化提供了有效途径[2]。国内外众多学者使用该数据开展了大量研究，且主要集中在地下水储量变化监测[11-12]，也有部分学者开展了技术方法改进、精度检测和空间分辨率降尺度[13-14]等方面的研究。已有研究在量化

收稿日期：2022-03-04； **修订日期**：2022-05-19
基金项目：国家自然基金(51779209)；山西省高校哲学社会科学项目(2020W165)资助
作者简介：邓椿(1981-)，男，博士，主要从事黄河流域水资源研究. E-mail: dengchun-2005@163.com
通讯作者：蒋晓辉(1972-)，男，博士，教授级高级工程师，博士生导师，主要从事水文水资源研究. E-mail: xhjiang@nwu.edu.cn

地下水储量的动态变化方面取得丰富的成果，对本研究具有重要的借鉴作用，但鲜有文献研究地下水储量变化与人口暴露风险的关系，而这方面又是科学制定水资源政策的重要依据。

黄河流域以约占全国2%的径流量，承载了全国9%的人口，水资源是其生产、生活的制约性要素，故本文以黄河流域为研究区，基于全球陆面数据同化系统（Global land data assimilation system, GLDAS）和GRACE遥感数据，测算了黄河流域长时间序列的地下水储量变化，结合LandScan遥感数据，探讨地下水储量变化与人口暴露的关系，主要研究内容包括：分析黄河流域地下水储量变化时空变化特征、识别地下水储量持续下降的区域，并分析该区域人口暴露风险情况，以期为黄河流域地下水资源可持续利用提供科学参考。

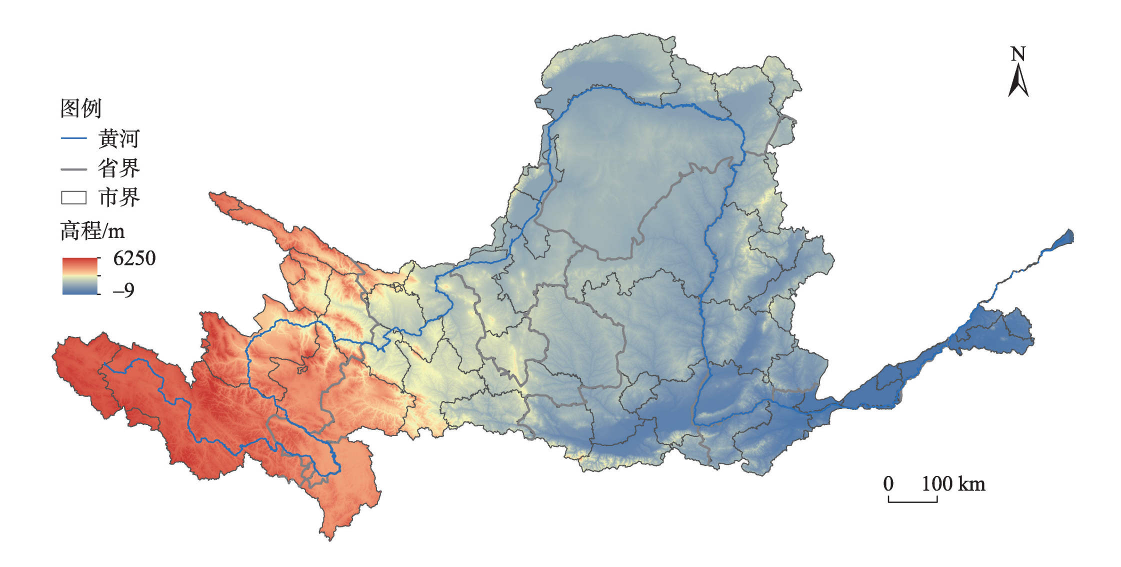
1 研究区概况

黄河发源于青藏高原，流域面积达 75.24×10^4 km^2，流经青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省、山东省共9个省区[15]（图1）。黄河以约占全国2%的径流量，承载了全国9%的人口，另外，本流域和流域外引黄灌区占全国15%的耕地面积，因此，黄河流域在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。由于其主要产流区处于西北干旱半干旱区，多年平均降水量约450 mm，水资源量少且时空分布不均，随着经济社会的不断发展，该区域取水量一直居高不下，流域水资源供需矛盾日益突出[16]。因此，开展黄河流域地下水储量变化与人口暴露研究，对于黄河水资源配置战略调整，实现流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 陆地水储量数据 GRACE卫星上搭载了精密的测距仪器，可以通过双星之间的距离变化反演地球表层局部重力变化情况，再根据重力变化推导出监测区域内陆地总水储量的变化[17]。已有研究表明，基于GRACE卫星数据反演地下水储量与监测井数据较一致，适用于中国区域的地下水储量研究。GRACE数据的处理、分发与管理由Jet Propulsion Lab（美国喷气动力实验室），GeoForschungsZentrum（德国地学研究中心），the University of Texas Center for Space Research（美国德克萨斯大学空间研究中心）3家集体负责，其每月提供地球重力场模型，并在验证后分发给公众。GRACE数据产品包括Level-0、Level-1A、Level-1B和Level-2，但不免费对外公布，为了方便研究质量异常（如水层）的用户，一些团队基于Level-2数据经地球物理校正后生成3级数据产品，以.nc的格式存储，获取方便且可免费



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

下载，数据链接为https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_CLSM025_DA1_D_2.2/summary?keywords=CLSM%20groundwater。

2.1.2 土壤含水量数据 土壤含水量数据来源于戈达德地球科学数据与信息服务中心(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_NOAH025_M_2.1/summary?keywords=GLDAS%20CSRM)。该研究选取了GLDAS-2.1版本的Noah模型输出土壤含水量数据，时间序列为2003—2016年的逐月土壤含水量数据。数据共包含4层土壤水分数据，分别为地下0~10 cm、地下10~40 cm、地下40~100 cm和地下100~200 cm共4层，土壤水分数据求和得到地下2 m土壤水分。将2003—2016年每月土壤含水量减去时段多年平均值，得到土壤含水量距平值，便可得到逐月土壤含水量变化。

2.1.3 其他数据 人口数据来源于LandScan全球人口格网数据(https://landscan.ornl.gov)，空间分辨率为1 km，已有大量学者使用该数据在中国区域进行精度验证与科学研究[18-19]。植被覆盖度分2步获得：第一步是采用最大值合成法合成年NDVI数据，数据获取自网站https://landweb.nascom.nasa.gov/，时间分辨率为16 d，空间分辨率为250 m。第二步利用公式求得植被覆盖度。

2.1.4 数据预处理 首先，将获取所有原始影像数据转换为UTM投影，地理坐标系为WGS84坐标；其次，基于黄河流域矢量进行掩膜处理；最后，采用重采样工具，把研究所需的所有栅格数据重采样至最小栅格分辨率上，其空间分辨率为1 km的栅格数据，以保持栅格数据像元大小的一致性，时间分辨率以月为尺度进行匹配。

2.2 研究方法

2.2.1 地下水储量计算方法 根据水量平衡原理计算2003—2016年黄河流域地下水储量年均变化量。陆地水储量的变化是由土壤水、地表水、雪/冰川融水以及地下水储量的变化引起。而在长时间尺度上，土壤含水量和地下水储量变化是陆地水储量变化的主要原因，雪水当量及地表水蓄水量变化可以忽略不计[20]。从GRACE反演的陆地水储量变化中减去土壤含水量变化得到地下水储量变化。计算公式如下：

$$\Delta GWS_i = \Delta TWS_i - \Delta SMS_i \tag{1}$$

式中：i为年份；ΔGWS_i为第i年地下水储量年均变化量(mm)；ΔTWS_i为第i年陆地水储量年均变化量(mm)；ΔSMS_i为第i年土壤水年均变化量(mm)。

2.2.2 Theil-Sen Median趋势分析 Theil-Sen Median趋势分析是一种稳健的非参数统计趋势计算方法[21]，可用来反映黄河流域地下水储量长时间序列演化趋势，计算公式如下：

$$S_W = \mathrm{Median}\left(\frac{W_j - W_i}{j-i}\right),\quad 2003 \leqslant i \leqslant j \leqslant 2016 \tag{2}$$

式中：W_j为第j年的黄河流域地下水储量等效水高(mm)；W_i为第i年的黄河流域地下水储量等效水高(mm)；S_W反映黄河流域地下水储量等效水高变化的单调趋势，为计算$n(n-1)/2$个数据组合的斜率中位数。当$S_W>0$时，黄河流域地下水储量呈增长趋势；当$S_W<0$时，黄河流域地下水储量则呈减少趋势。

2.2.3 Mann-Kendall检验 采用Mann-Kendall方法检验黄河流域地下水储量时间趋势的显著性，设定时间序列$\{W_i\}$，i=2003，2004，…，2016，计算公式[22]如下：

$$\text{定义}Z\text{统计量为: } Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S<0 \end{cases} \tag{3}$$

$$\text{其中, } S = \sum_{j=1}^{n-1}\sum_{i=j+1}^{n} \mathrm{sgn}(W_j - W_i)$$

$$\mathrm{sgn}(W_j - W_i) = \begin{cases} 1, & W_j - W_i > 0 \\ 0, & W_j - W_i = 0 \\ -1, & W_j - W_i < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{14} \tag{5}$$

式中：S为变化性的统计变量；$s(S)$为S的方差；n为时间序列的长度；$\mathrm{sgn}(W)$为符号函数。当$|Z|>\mu_{1-\alpha/2}$，表明在α水平上存在显著变化。该研究在α=0.05置信水平上判断黄河流域地下水储量时间序列上变化趋势的显著性。对检验结果进行分级，按照显著性可分为极显著变化($|Z|>2.58$)、显著变化($1.96<|Z|\leqslant 2.58$)、弱显著变化($1.65<|Z|\leqslant 1.96$)和无显著变化($0<|Z|\leqslant 1.65$)4个等级。

2.2.4 地下水储量变化分级方法 参考He等[23]采用标准差分级法，根据历年地下水储量变化均值和标准差确定每段分割的端点，将2003—2016年地下水储量等效水高分为5个级别，分别为增加、稳定、减少、较剧烈减少、剧烈减少(表1)。

表1　地下水储量变化分级标准

Tab. 1　Grading standard for changes in groundwater storage

地下水储量等级	剧烈减少	较剧烈减少	减少	稳定	增加
分级标准	$<\bar{x}-1.5s$	$\bar{x}-1.5s$~$\bar{x}-0.5s$	$\bar{x}-0.5s$~$\bar{x}+0.5s$	$\bar{x}+0.5s$~$\bar{x}+1.5s$	$>\bar{x}+1.5s$
年均变化率/mm·a^{-1}	<-58.38	-58.38~-34.54	-34.54~-10.70	-10.70~13.14	>13.14

注：$\bar{x}$ 为中国2003—2016年地下水储量年均变化率均值；s 为其标准差。

3　结果与分析

3.1　地下水储量空间变化特征

2003—2016年黄河流域地下水储量年均等效水高在空间上呈现显著的东西差异，东部减少西部增加，多年平均等效水高为-22.62 mm·a^{-1}，由西向东地下水储量的下降程度不断加剧，且下降区域呈现由下游向中上游扩散的态势(图2)。其中，下降区域主要集中在中东部地区，变化等级以较剧烈减少和剧烈减少为主。研究初期，剧烈减少的区域包含西安市、洛阳市、三门峡市、郑州市等城市；研究末期，已包含黄河中下游的大部分城市，甚至上游的玉树藏族自治州、果洛藏族自治州、海南藏族自治州等也成为剧烈减少区域。这是由于黄河中下游地区经济增长快、人口集聚能力强，使得农业、工业和生活用水不断增加，而地下水补充速率远远低于消耗速率，故地下水储量不断减少。而西南部的地下水储量仍以增加为主，这是由于该区域的地形以青藏高原和黄土高原为主，平均海拔2000 m以上，人口稀少且工农业欠发达，地下水资源量消耗总量少，加之全球气候变化引起局部地区冰川融水增加，使得黄河流域上游地下水补给速率大于消耗速率，因此地下水储量变化呈增加趋势。

3.2　地下水储量时序变化特征

3.2.1　时序总体特征　通过分区统计黄河流域2003—2016年地下水储量变化情况，由图3可知地下水储量变化整体呈下降趋势。该区域地下水储量等效水高最高值为2004年的10.32 mm，最低值为2016年的-75.56 mm，2003—2016年地下水储量年

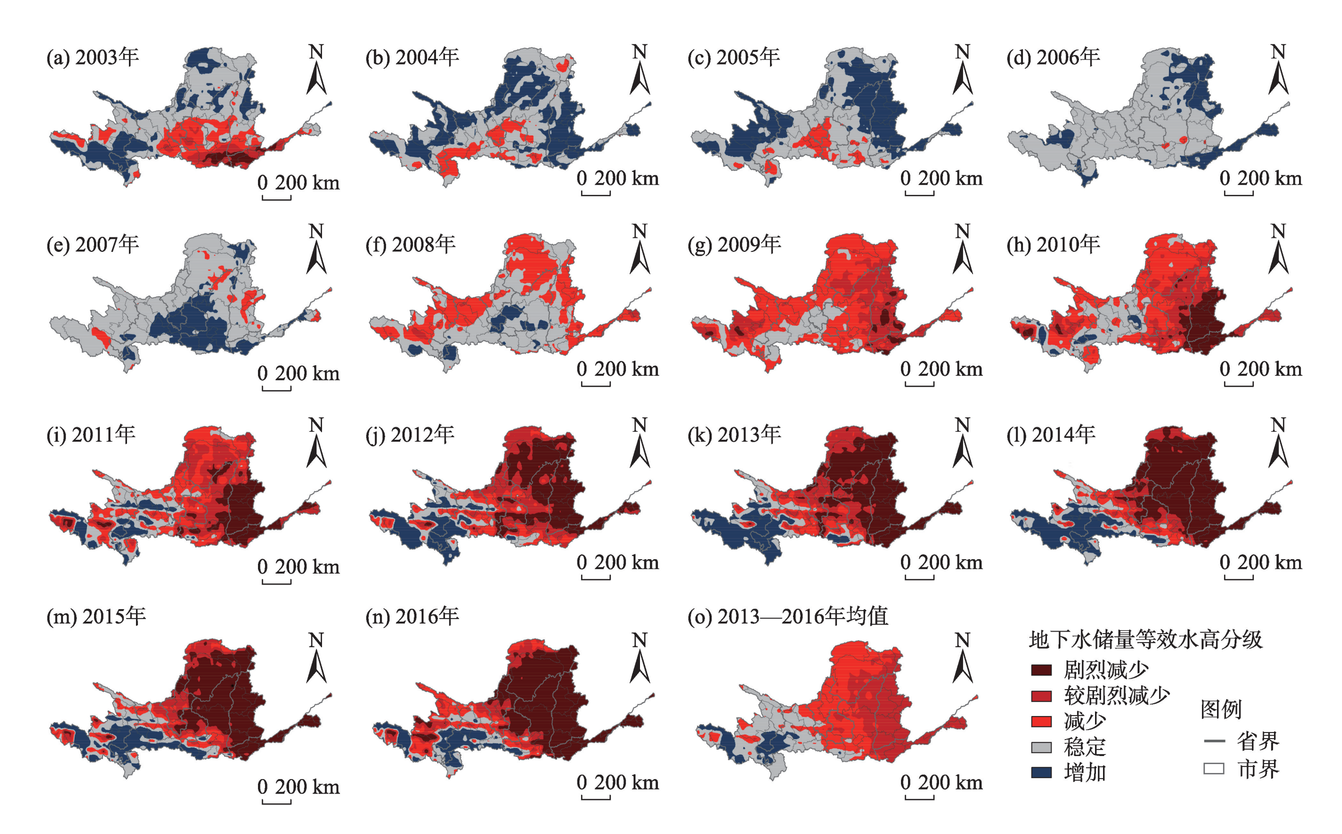


图2　2003—2016年黄河流域地下水储量空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of groundwater storage in the Yellow River Basin from 2003 to 2016

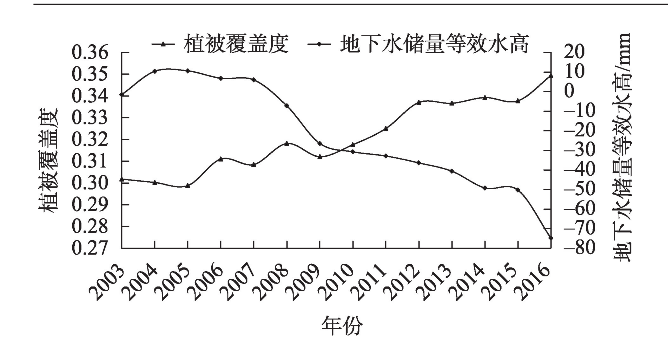


图3 2003—2016年黄河流域地下水储量与植被覆盖度变化关系

Fig. 3 Relationship between groundwater storage and fractional vegetation cover in the Yellow River Basin from 2003 to 2016

均降幅为5.93 mm·a^{-1}。其中,2003—2007年黄河流域地下水储量等效水高变化幅度较小,至2008年时,黄河流域地下水储量主要变化特征由增加变为减少,而2009—2016年则呈现出持续下降的趋势,特别是2015—2016年降幅最大,下降24.41 mm,最大降幅为47.74%。

统计2003—2016年黄河流域地下水储量历年春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—次年2月)的均值,发现呈现明显季节变化特点(图4)。春冬季下降幅度大,夏秋季下降幅度减小。这是因为黄河流域受季风气候影响,夏秋季是雨季,地表径流补给地下水,而冬春季为枯季,地下水补给地表水。地下水储量下降幅度春季最大、冬季次之、秋季再次之、夏季最小。其中,春季地下水储量等效水高均值为−58.92 mm,冬季地下水储量等效水高均值为−54.12 mm,秋季地下水储量等效水高均值为−47.81 mm,夏季地下水储量等效水高均值为−38.02 mm。

3.2.2 时序趋势特征 为了进一步刻画黄河流域地下水储量时间序列的线性变化趋势,利用Theil-Sen Median和Mann-Kendall方法将S值与$|Z|$值重分类后再进行同像元叠加,得到黄河流域地下水储量线性显著性变化趋势(图5)。黄河流域地下水储量线性显著性变化趋势共分为7个类别,分别是弱显著减少、显著减少、极显著减少、弱显著增加、显著增加、极显著增加和无显著变化,各类面积见表2。结合图5与表2可知,黄河流域地下水储量时序线性显著性变化特征以减少为主。其中极显著减少的区域主要分布在中下游地区,包括陕西省中北部和山西省大部分地区,河南省和山东省的黄河沿岸地区等,总面积为50.62×10^4 km^2,占黄河流域总面积的63.60%;显著减少的区域分布在青海省海北藏族自治州和西宁市,总面积为2.36×10^4 km^2,占黄河流域

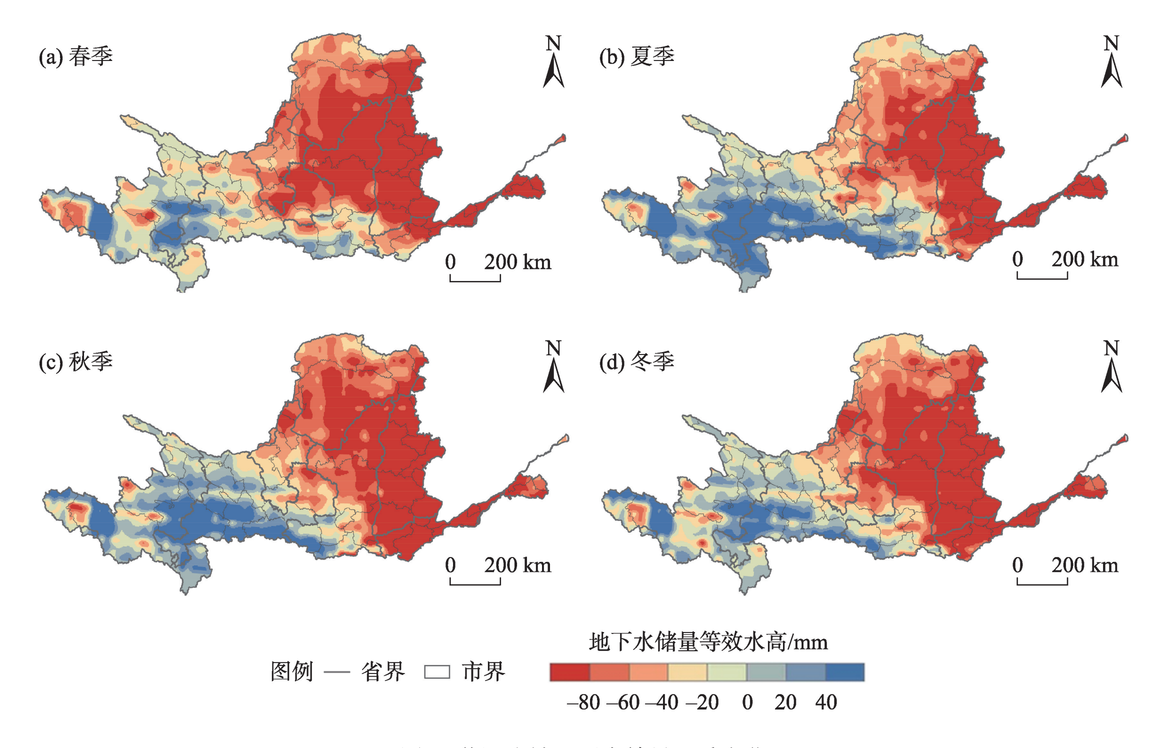


图4 黄河流域地下水储量四季变化

Fig. 4 Seasonal variation of groundwater storage in the Yellow River Basin

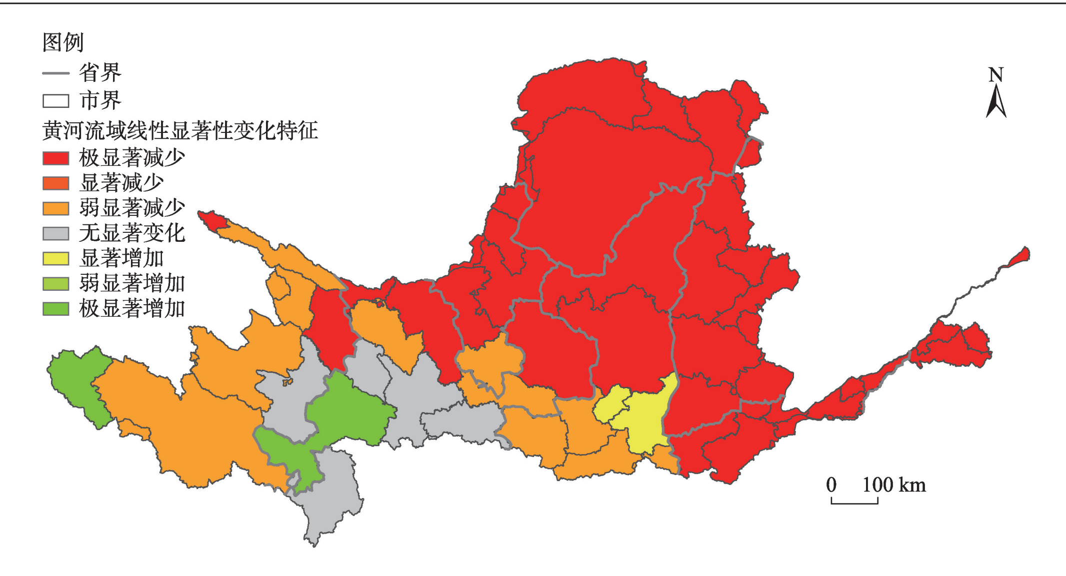


图5　黄河流域地下水储量线性显著性变化趋势

Fig. 5　Linear significant change trend of groundwater storage in the Yellow River Basin

表2　黄河流域地下水储量面积变化

Tab. 2　Variation of groundwater storage area in the Yellow River Basin

变化类型	弱显著减少	显著减少	极显著减少	弱显著增加	显著增加	极显著增加	无显著变化
面积/10^4 km^2	15.65	2.36	50.62	3.13	0.00043	6.13	1.69
百分比/%	19.66	2.96	63.60	3.94	0.00050	7.70	2.13

总面积的2.96%。综上，黄河流域地下水储量主要时序变化特征为持续减少，这是由人文与自然因素共同作用形成，一方面工农业生产和生活用水总量在不断增加，人水矛盾愈发突出；另一方面，生态用水在逐年加大，如研究发现植被变化与地下水储量呈显著的负相关关系。2003—2016年黄河流域植被覆盖度时间序列上的变化趋势呈现显著的上升趋势，与地下水储量的年际变化趋势相反。2003年植被覆盖度为0.30，2016年增长至0.35，呈稳步增长的状态，地表植被覆盖情况日益改善（图3）。使用SPSS对两者进行相关性分析，发现在P<0.01显著性水平上，皮尔逊相关系数为-0.97，呈显著的负相关关系。黄河流域气候类型以干旱半干旱气候为主，地下水储量与植被生态环境的关系相较于其他气候区更为密切，植被覆盖度的增加会消耗大量的水资源，且以地下水为主，说明植被覆盖度变化对当地地下水水资源储量产生深刻影响。

3.3　地下水储量下降区人口暴露风险状态

3.3.1　暴露风险状态下人口分布　为精确识别黄河流域地下水暴露风险区，将研究区地下水储量线性变化趋势中显著减少与极显著减少的区域定义为地下水暴露风险区。将暴露风险区人口密度分为6个级别[18]，分别为无分布、1~20人·km^{-2}、21~50人·km^{-2}、51~100人·km^{-2}、101~200人·km^{-2}和>200人·km^{-2}。以2016年为例，统计了研究区内市级行政单元地下水暴露风险下人口密度（图6）。黄河流域地下水暴露风险状态下的地级市人口密度在空间上呈东高西低、中部交错分布的状态。其中，暴露风险区人口密度>200人·km^{-2}的地级市共16个，包括兰州市、银川市、西安市、渭南市、晋中市、运城市、临汾市、济源市、安阳市、濮阳市、焦作市、新乡市、郑州市、菏泽市、泰安市和济南市；暴露风险区人口密度>100人·km^{-2}且≤200人·km^{-2}的地级市共5个，分别为临夏回族自治州、乌兰察布、晋城市、吕梁市和洛阳市；暴露风险区人口密度>50人·km^{-2}且≤100人·km^{-2}的地级市共4个，分别为白银市、平凉市、包头市和三门峡市；暴露风险区人口密度为0~50人·km^{-2}的地级市交错分布。

3.3.2　地下水储量下降人口占比　为便于分析，将2004—2016年每隔4 a统计地下水储量等效水高变化幅度分为17个不等间距的区间，并计算超过各级限值的人口累积百分比（图7）。结果表明超过各级

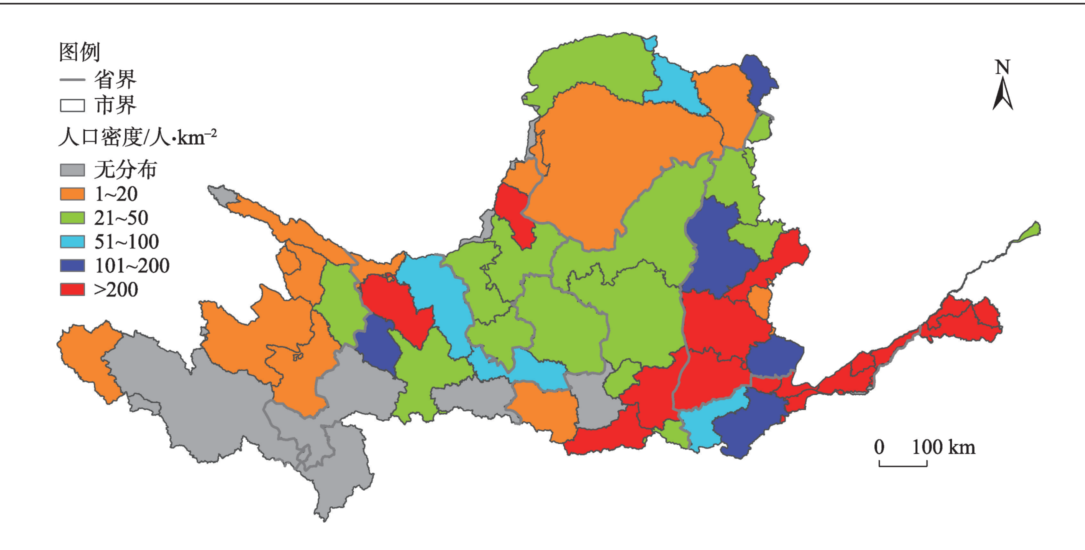


图6 黄河流域地下水暴露风险下人口密度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of population density under groundwater exposure risk in the Yellow River Basin

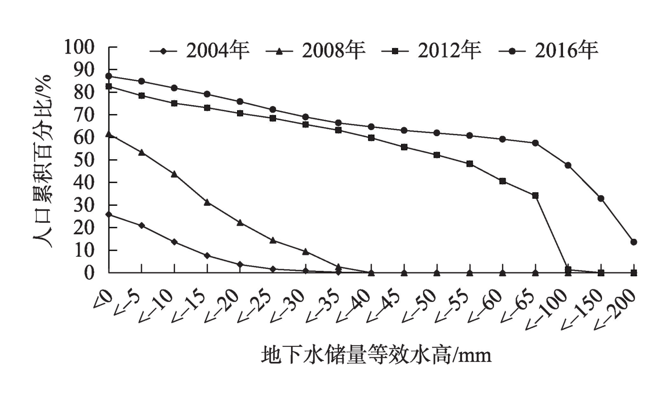


图7 黄河流域地下水储量的下降水平超过各级限值的人口累积百分比

Fig. 7 Percentage of population whose groundwater storage decline level exceeds the limits at all levels in the Yellow River Basin

限值的暴露人口累积百分比曲线在2004—2016年向右移动，呈明显上升的趋势。其中，等效水高<0 mm的区域人口在2004年有1517.62×10⁴人，占黄河流域总人口的25.80%，2008年上升至3705.02×10⁴人，占比上升至61.54%，2012年占比达到82.55%，2016年占比达到最高为87.04%，地下水储量下降区总人口上升至3908.94×10⁴人；等效水高<-15 mm的区域人口在2004年有445.96×10⁴人，仅占区域总人口的7.58%，2008年陡升至31.26%，2012年更是达到73.08%，2016年上升至最高79.07%；等效水高<-35 mm的区域人口在2004年有16.46×10⁴人，仅占流域总人口的0.28%，2008年上升至2.60%，2012年骤然上升至63.12%，2016年高达到66.35%；等效水高<-55 mm的区域人口，2012占区域总人口的48.26%，2016年占比达60.72%；等效水高<-65 mm的区域人口在2012年占区域总人口的34.17%，2016年上升为57.44%。

4 讨 论

地下水储量急剧下降不仅威胁到城市居民的用水安全，还会引起地面沉降等问题，成为威胁区域城市发展及居民安全的重大灾害隐患[24]。目前，干旱半干旱区地下水储量长时间序列宏观尺度的研究还较少，这是由于中国地质结构复杂，含水层较破碎[25]，且地下水储量人工监测成本高、难度大。该研究融合GRACE、GLDAS和LandScan人口数据等多种遥感数据，并参考前人研究思路，根据流域水循环与水量平衡原理，测算黄河流域2003—2016年地下水储量，识别其时空变化趋势与特征，分析该区域地下水储量在不同降级下的人口暴露特征。

研究结果表明黄河流域地下水储量逐年下降，人口暴露占比持续上升。对比已有研究，如冯伟等[26]得出华北平原2002—2014年地下水等效水高质量亏损为(56±6)mm·a⁻¹；Yi等[27]发现2003—2014年黄河-淮河-辽河-海河流域的地下水质量损失也比较明显，损失的质量为(10.2±0.9)Gt·a⁻¹；李婉秋等[28]研究表明关中地区2003—2014年地下水储量存在长期亏损，亏损速率为3.70 mm·a⁻¹。综上，本研究结论与已有研究基本一致。基于此，在黄河流域生态保护与高质量发展的背景下，相关部门应将

地下水资源安全与粮食安全放在同等重要的位置，应积极发展节水农业、重点区域采用淡水回灌补充地下水等手段，保证黄河流域地下水储量安全[29]。该研究不但揭示了地下水储量变化的时空特征，还探究了流域不同地区人口暴露分析的空间异质性，研究结果有助于厘清黄河流域人水矛盾的重点区域，对实现流域可持续发展具有重要意义。

然而，本研究可能存在以下不足。(1) 数据方面。首先，考虑数据可获得性，本文只选取一代GRACE数据，时间序列为2003—2016年，这就限制研究的时效性。同时，本研究所用的GRACE数据，虽经过了数据校正和地理信息技术处理，但是受制于时空分辨率限制，仍然存在一定的不确定性。此外，偶然因素也影响GRACE部分月数据精度，李杰等[30]对GRACE时间序列进行月趋势项和平均值，孙倩等[31]采用三点滑动平均法消除了季节内的随机波动。此外，对于土壤水分数据的处理也有无法避免的不确定性，因为许多地区地表水文过程较为复杂且地表水数据缺乏，许多研究计算所得的地表水储量变化与实际值往往相差较大。为减小计算地表水数据过程中的不确定性，土壤含水量数据由GLDAS-NOAH模型输出，而NOAH模型中只考虑了4层土壤含水量，仅包含地表下2 m的土壤含水量。为此，有部分学者计算了GLDAS的CLM、MOSAIC、NOAH和VIC这4个模型输出的土壤含水量数据，分别对应3.43 m、3.50 m、2.00 m和1.90 m土壤含水量，然后取其平均值。尽管本研究在充分参考前人的理论方法，最终确定选取GLDAS-NOAH模型输出的土壤含水量数据，包含地表下2 m的土壤水含量，但仍存在一定不确定性。(2) 对黄河上游地下水储量计算有待进一步细化，尽管本研究中借鉴前人思路，认为土壤含水量和地下水储量变化是陆地水储量变化的主要原因，雪水当量及地表水蓄水量变化可以忽略不计[20]，这对于黄河中下游是有效的，但若重点关注黄河上游地区地下水储量的变化，充分考虑雪水、植物根区水和冠层水等对地下水储量的影响是非常有必要的。(3) 地下水储量变化与人类经济活动的关系有待进一步挖掘。

在未来的工作中，以下3个方面有待进一步研究。第一，基于GRACE数据，结合地下水实测站点数据，反演中国更高时空分辨率地下水储量数据，并填补两代GRACE卫星数据空白期数据，以更精确地探究干旱半干旱区地下水时空动态变化过程与影响机制。第二，黄河流域地下水储量变化主要集中在中下游地区，是本文的研究重点，而上游高海拔地区的地下水储量变化小，人类经济活动对其影响较小，并考虑到GRACE数据的空间分辨率问题，因此在黄河流域地下水储量变化计算时只考虑了土壤水分的影响，下一步工作中应补充雪水和植物水变化对地下水储量变化的影响。第三，数据方面，结合便携式绝对重力仪和地下水监测井数据对地下水储量的空间分布及变化趋势进行反演、验证和分析，以便进一步研究人水矛盾突出区域的地下水资源演变规律，为黄河流域未来经济发展与资源可持续利用提供科学参考。

5　结 论

(1) 从空间特征看，黄河流域地下水储量变化特征在空间上呈明显的东西差异，东部减少西部增加，多年平均等效水高为−22.62 mm·a^{-1}，由西向东地下水储量的下降程度不断加剧，且下降区域呈由下游向中上游扩散的态势。其中，下降区域主要集中在中东部地区，变化等级以较剧烈减少和剧烈减少为主。研究初期，剧烈减少的区域包含西安市、洛阳市、三门峡市、郑州市等城市；研究末期，已包含黄河中下游的大部分城市，甚至上游的玉树藏族自治州、果洛藏族自治州、海南藏族自治州等也成为剧烈减少区域。表明黄河流域人水关系矛盾日趋突出，该区域经济发展一定程度上依赖于地下水资源的过度开采。

(2) 从时间特征看，一方面，2003—2016年黄河流域地下水储量时间变化特征为下降。该区域地下水等效水高最高值为2004年的10.32 mm，最低值为2016年的−75.56 mm，2003—2016年地下水储量年均降幅为5.93 mm·a^{-1}。其中，2015—2016年降幅最大，下降24.41 mm，最大降幅为47.74%。另一方面，地下水储量时间变化存在季节效应，地下水储量下降幅度春季最大、冬季次之、秋季再次之、夏季最小。春季地下水等效水高均值为−58.92 mm，冬季地下水等效水高均值为−54.12 mm，秋季地下水等效水高均值为−47.81 mm，夏季地下水等效水高均值为−38.02 mm。

(3) 从人口暴露风险看，黄河流域地下水暴露风险状态下的地级市人口密度在空间上呈东高西

低、中部交错分布的状态，暴露风险区人口密度最大地级市共16个，包括兰州市、银川市、西安市、渭南市、晋中市、运城市等。地下水储量下降幅度超过各级限值的人口累积百分比不断增加，在2016年达到最大值，人水矛盾十分突出。

参考文献（References）

[1] 陶征广, 陶庭叶, 丁鑫, 等. 基于GRACE和GLDAS水文模型反演安徽省地下水储量变化[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(4): 1456-1463. [Tao Zhengguang, Tao Tingye, Ding Xin, et al. Groundwater storage changes in Anhui Province derived from GRACE and GLDAS hydrological model[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(4): 1456-1463.]

[2] 涂梦昭, 刘志锋, 何春阳, 等. 基于GRACE卫星数据的中国地下水储量监测进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(6): 643-656. [Tu Mengzhao, Liu Zhifeng, He Chunyang, et al. Research progress of groundwater storage changes monitoring in China based on GRACE satellite data[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(6): 643-656.]

[3] 赵珍珍, 冯建迪. 基于多源数据的科尔沁沙地陆地水及地下水储量变化研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 119-125, 131. [Zhao Zhenzhen, Feng Jiandi. Investigation of water storage variation in Horqin Sandy Land based on multi-source data[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 119-125, 131.]

[4] Howard K W F. Sustainable cities and the groundwater governance challenge[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(6): 2543-2554.

[5] 李嘉, 唐河, 饶维龙, 等. 南水北调工程对华北平原水储量变化的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6): 775-783. [Li Jia, Tang He, Rao Weilong, et al. Influence of South-to-North Water Transfer Project on the changes of terrestrial water storage in North China Plain[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(6): 775-783.]

[6] Long D, Pan Y, Zhou J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models[J]. Remote Sensing of Environment, 2017(192): 198-216.

[7] 许厚泽. 卫星重力研究: 21世纪大地测量研究的新热点[J]. 测绘科学, 2001, 26(3): 1-3. [Xu Houze. Satellite gravity missions: New hotpoint in geodesy[J]. Science of Surveying and Mapping, 2001, 26(3): 1-3.]

[8] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436. [Lu Dadao, Sun Dongqi. Comprehensive management and sustainable development of the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431-2436.]

[9] 宫辉力, 李小娟, 潘云, 等. 京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律[J]. 中国科学基金, 2017, 31(1): 72-77. [Gong Huili, Li Xiaojuan, Pan Yun, et al. Groundwater depletion and regional land subsidence of the Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2017, 31(1): 72-77.]

[10] 杨阳. 关中地区地下水储量时空变化监测与分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017. [Yang Yang. Monitoring and analysis of temporal and spatial variation of groundwater reserves in Guanzhong area[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.]

[11] 胡鹏飞, 李净, 张彦丽, 等. 黄土高原水储量的时空变化及影响因素[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 176-186. [Hu Pengfei, Li Jing, Zhang Yanli, et al. Temporal and spatial variation and influencing factors of water storage on the Loess Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1): 176-186.]

[12] 徐子君, 尹立河, 胡伏生, 等. 2002—2015年西北地区陆地水储量时空变化特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(4): 314-320. [Xu Zijun, Yi Lihe, Hu Fusheng, et al. Spatial and temporal variations of terrestrial water storage in northwest China during 2002—2015[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(4): 314-320.]

[13] 曹艳萍, 南卓铜, 胡兴林. 利用GRACE重力卫星数据反演黑河流域地下水变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 680-689. [Cao Yanping, Nan Zhuotong, Hu Xinglin. Changes of groundwater storage in the Heihe River Basin derived from GRACE gravity satellite data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 680-689.]

[14] Zhong Y, Zhong M, Feng W, et al. Groundwater depletion in the west Liaohe River Basin, China and its implications revealed by GRACE and in situ measurements[J]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 493, doi: 10.3390/rs10040493.

[15] 张凯莉, 冯荣荣, 刘潭, 等. 黄河流域城市化与生态系统服务价值协调性及障碍因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1254-1267. [Zhang Kaili, Feng Rongrong, Liu Tan, et al. Coordination and obstacle factors of urbanization and ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1254-1267.]

[16] 袁磊, 韩双宝, 李甫成, 等. 黄河流域灌溉发展演变及对地下水资源的影响[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 80-84. [Yuan Lei, Han Shuangbao, Li Fucheng, et al. Evolution of irrigation development in the Yellow River Basin and its impact on groundwater resources[J]. Yellow River, 2022, 44(4): 80-84.]

[17] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.

[18] 张亮林, 潘竟虎. 中国$PM_{2.5}$人口暴露风险时空格局[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 1-12. [Zhang Lianglin, Pan Jinghu. Spatial-temporal pattern of population exposure risk to $PM_{2.5}$ in China[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 1-12.]

[19] 王雪梅, 李新, 马明国. 基于遥感和GIS的人口数据空间化研究进展及案例分析[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 320-327.

[Wang Xuemei, Li Xin, Ma Mingguo. Advance and case analysis of population spatial distribution based on remote sensing and GIS [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(5): 320-327.]

[20] Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. Evaluation of groundwater depletion in north China using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) data and ground-based measurements[J]. Water Resources Research, 2013, 49(4): 2110-2118.

[21] Sen P K. Estimates of the regressions coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.

[22] 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 等. 关中地区$PM_{2.5}$时空演化及人口暴露风险[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5245-5255. [Huang Xiaojun, Qi Mingyue, Li Yanyu, et al. Spatio-temporal evolution and population exposure risk to $PM_{2.5}$ in the Guanzhong area[J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5245-5255.]

[23] He C, Ma Q, Li T, et al. Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese Mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 125-136.

[24] Zhou F, Bo Y, Ciais P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(14): 7702-7711.

[25] 魏士禹, 郭云彤, 崔亚莉, 等. 1985—2016年民勤地下水位及储变量动态特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1272-1280. [Wei Shiyu, Guo Yuntong, Cui Yali, et al. Dynamic characteristics of groundwater level and storage variables in Minqin from 1985 to 2016[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1272-1280.]

[26] 冯伟, 王长青, 穆大鹏, 等. 基于GRACE的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1630-1642. [Feng Wei, Wang Changqing, Mu Dapeng, et al. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(5): 1630-1642.]

[27] Yi S, Wang Q, Sun W. Basin mass dynamic changes in China from GRACE based on a multibasin inversion method[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2016, 121(5): 3782-3803.

[28] 李婉秋, 王伟, 章传银, 等. 利用GRACE卫星重力数据监测关中地区地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2237-2245. [Li Wanqiu, Wang Wei, Zhang Chuanyin, et al. Monitoring groundwater storage variations in the Guanzhong area using GRACE satellite gravity data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2237-2245.]

[29] 陈永金, 艾克热木·阿布拉, 张天举, 等. 塔里木河下游生态输水对地下水埋深变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 651-658. [Chen Yongjin, Abula Aikeremu, Zhang Tianju, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater depth in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 651-658.]

[30] 李杰, 范东明, 游为. 利用GRACE监测中国区域干旱及其影响因素分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(6): 587-595. [Li Jie, Fan Dongming, You Wei. Using GRACE to monitor regional drought in China and its influencing factors[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(6): 587-595.]

[31] 孙倩, 阿丽亚·拜都热拉. 基于GRACE卫星和GLDAS系统的地下水水位估算模型——以和田地区克里雅河流域为例[J]. 地理科学进展, 2018, 37(7): 50-60. [Sun Qian, Baidourela Aliya. Mathematical fitting of influencing factors and measured groundwater level: Take Keriya River Basin in Hetian area as an example [J]. Advances in Earth Science, 2018, 37(7): 50-60.]

Groundwater storage and population exposure in the Yellow River Basin based on GRACE data

DENG Chun[1,2], JIANG Xiaohui[1], SUN Weifeng[2]

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University/Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Department of Economics and Management, Yuncheng University, Yuncheng 044000, Shaanxi, China)

Abstract: In recent years, the contradiction between humans and water resources in the Yellow River Basin, China has become increasingly prominent, particularly the excessive consumption of groundwater has become one of the main contradictions restricting the harmonious development of humans and nature in this region. Based on GRACE satellite data and GLDAS data, the change in groundwater storage of the Yellow River Basin was calculated from 2003 to 2016, then its temporal and spatial characteristics were explored, and population exposure in areas with significant groundwater decline was identified. The results show the following: (1) In terms of spatial distribution, the groundwater storage of the Yellow River Basin are more in the west and less in the east, the degree of decline from the west to east continues to intensify, and the decline area shows a spreading trend from the lower reaches to the middle and upper reaches. (2) The groundwater storage showed a downward trend in the Yellow River Basin from 2003 to 2016, with an average annual decrease of 5.93 $mm \cdot a^{-1}$. It is a continuous decline from 2004 to 2016, and the biggest drop occurs in 2015—2016. In addition, there is a seasonal effect on the time change of groundwater storage, groundwater storage declines the most in spring, the second most in winter, the third most in autumn, and the least in summer. (3) Based on the risk of groundwater exposure, the characteristics of population density of prefecture-level cities are high in the east, low in the west, and have a staggered distribution in the middle, and there are 16 prefecture-level cities with the highest population density at risk of exposure. The cumulative percentage of the population with groundwater storage decline exhibited a clear upward trend, reaching a maximum in 2016. The results provide scientific reference for sustainable utilization of groundwater resources in the Yellow River Basin.

Key words: GRACE; groundwater storage change; spatial-temporal characteristics; population exposure risk; Yellow River Basin